

解禁時間 (テレビ、ラジオ、WEB) : 平成 28 年 10 月 21 日 (金) 午前 3 時
(新聞) : 平成 28 年 10 月 21 日 (金) 付朝刊



平成 28 年 10 月 18 日

日本電信電話株式会社

Tel : 046-240-5157 (広報担当)

情報・システム研究機構 国立情報学研究所

Tel : 03-4212-2164 (広報チーム)

科学技術振興機構 (JST)

Tel : 03-5214-8404 (広報課)

内閣府政策統括官 (科学技術・イノベーション担当)

Tel : 03-6257-1339

光を使って難問を解く新しい量子計算原理を実現

～量子ニューラルネットワークの開発～

ポイント

- 測定フィードバックによる波束の収縮によりトリガーされる相転移^(注1)を動作原理とする新たな量子計算スキームを提案
- 全結合を施した光パラメトリック発振器群を用いて、この新しい計算機「量子ニューラルネットワーク」を実現
- ノード数 2,000 の組合せ最適化問題の解探索に成功し、現代コンピュータを凌駕する性能を実証
- 計算創薬、通信ネットワークの最適化、圧縮センシング、深層学習など、実社会における組合せ最適化問題への適用が今後期待される

内閣府 総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の山本喜久プログラム・マネージャーの研究開発プログラムの一環として、日本電信電話株式会社 (東京都千代田区、代表取締役社長 鶴浦博夫 以下、NTT) NTT 物性科学基礎研究所 量子光制御研究グループの武居弘樹 主幹研究員、稲垣卓弘 研究員らのグループと、情報・システム研究機構 国立情報学研究所 (東京都千代田区、所長 喜連川優 以下、NII) 情報学プリンシプル研究系の宇都宮聖子 准教授、Peter McMahon 研究員らのグループは、現代コンピュータでは効率よく解くことが困難とされている組合せ最適化問題の解を高速に求める「量子ニューラルネットワーク」を実現しました。

インターネット、電力ネット、センサネットなど、社会を構成する様々なネットワークが大規模化・複雑化する現在、リソースの最適化が重要な課題となっています。これらの課題の多くは組合せ最適化問題と呼ばれる、現代コンピュータが苦手とする数学的問題に帰着することが知られています。量子ニューラルネットワークは、光パラメトリック発振器と呼ばれる新型レーザの発振振幅を用いてスピン^(注2)を表した時、相互作用する多数のスピンが全体のエネルギーを最低とするようなスピン配列で発振する現象を利用して、組合せ最適化問題の解を探索するものです。今回、各光パラメトリック発振器の振幅を光ホモダイン検波器で測定し、得た情報を帰還する「量子測定フィードバック」を実装することで、全ての光パラメトリック発振器間の結合が可能な量子ニューラルネットワークを実現しました。これにより、最大 2,000 ノード・200 万結合の大規模組合せ最適化問題の解探索に成功し、現代コンピュータ上で動作する既存アルゴリズムを凌駕する性能を示しました。今後、創薬、無線通信、圧縮センシング、深層学習といった実社会の様々な組合せ最適化問題への本成果の適用が期待されます。

本研究は、NII の河原林健一 教授、東京大学の合原一幸 教授、大阪大学の井上恭 教授、スタンフォード大学の Martin Fejer 教授の研究グループと共同で行ったものです。

本研究成果を記述した 2 編の論文は、2016 年 10 月 20 日 13 時 (米国東部標準時) 発行の米国の科学誌「Science」のオンライン速報版で同時に公開されます。

本成果は、以下の事業・研究プロジェクトによって得られました。

内閣府革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)

プログラム・マネージャー : 山本 喜久

研究開発プログラム : 「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」

研究開発課題 : 「大規模時分割多重光パラメトリック発振器に基づくコヒーレントイジングマシン」、「コヒーレントイジング/XY マシンの原理と応用」

研究開発責任者 : 武居 弘樹、宇都宮 聖子

研究期間 : 平成26年度～平成30年度

■ ImPACTプログラム・マネージャーのコメント■



NTT のチームが推進する大規模光パラメトリック発振器群による量子ニューラルネットワークの実装と NII-スタンフォード大学のチームが推進する原理実証・応用探索は、ImPACT「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」プロジェクトの要の研究課題です。これは、組合せ最適化問題を高速に解くための量子ニューラルネットワークのハード/ソフト技術を確立するものだからです。

今回開発したマシンを使って、組合せ最適化問題の一つである最大カット問題の解を、高速に探索できることを実験的に実証した本成果は、実社会の様々な問題への適用を目指すにあたって、その拠り所となる成果です。本研究開発の成果を弾みに、量子ニューラルネットワークの実機開発と、一般ユーザに使っていただくためのクラウドサービスに向けた活動の、更なる加速を図ります。

<研究の背景と経緯>

現代社会の様々な分野、例えば創薬のための化合物探索、無線通信ネットワークにおけるリソース最適化、不完全な観測データから元情報をできるだけ忠実に再現する圧縮センシングなどでは、大規模な組合せ最適化問題を高速で解く計算手法が必要とされています。組合せ最適化問題とは、様々な条件の下で、多数ある選択肢の中から最適なものを選び出す問題で、問題サイズが大きくなると選択肢が爆発的に増えるために、現代コンピュータでは解くことが困難になることが知られています。組合せ最適化問題の多くは相互作用するスピン群のモデルである「イジングモデル」のエネルギー最低状態を求める問題に変換可能であることが知られています。そのために、様々な物理系を用いて人工スピン群を作製し、イジングモデルを通して組合せ最適化問題を高速に解く試みが世界の有力企業を中心に精力的に進められています。

現代コンピュータ技術を支える CMOS 電子回路の微細化技術が限界に近づき、18 ヶ月毎にコンピュータの性能が2倍になるという Moore の法則の終焉が現実のものとなってきた現在において、現代コンピュータとは計算原理が全く異なる新しい計算機モデルの必要性が認識されています。そのような取り組みの代表的な例として、表1に示す量子コンピュータ、量子アニーラなどがあります。

本 ImPACT 研究開発プログラムでは、光パラメトリック発振器を光伝送路で直接つないで簡単なイジングモデルを実装するコヒーレントイジングマシン (Coherent Ising Machine: CIM) の研究開発を進めてきました。CIM では、人工スピンとして光パラメトリック発振器 (Optical Parametric Oscillator: OPO) の位相を用います。OPO は、0 または π の位相しかとらない特殊なレーザ発振器で、位相 0、 π をそれぞれ上向き、下向きのスピンに対応させることができます。各 OPO を光伝送路を介して互いに結合することで、スピン間の相互作用を実現します。光伝送路によりネットワーク化された OPO 群は、多くの場合ネットワーク全体の損失が最小となる位相の組合せで発振するため、イジングモデルの基底状態を与えるスピンの組合せを高い確率で得ることができます。

2014 年に4つの OPO からなる CIM が報告された後、OPO 数は16へ拡張され、2016年4月には OPO 数を10,000へと飛躍的に増大することに成功しました。しかし、スピン間相互作用を光伝送路を用いて実装していたため、限られたネットワーク構造を実現するにとどまっていた。現実社会で課題となっている複雑な組合せ最適化問題に適用するためには全ての OPO 間に結合を実装する全結合を実現する必要がありました。

<研究の内容>

今回開発した量子ニューラルネットワーク (Quantum Neural Network: QNN) では、長距離光ファイバで構成された共振器を周回する時分割多重 OPO パルス (スピン) 群をニューロンと見立てます。また、各 OPO パルスの発振位相・振幅の近似測定を行い、その情報をもとに OPO 間の結合信号を FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いて生成し、これをフィードバック用光パルスに重畳して各 OPO パルスに帰還する「量子測定フィードバック」回路をシナプス結合と見立てたシステムを実現しました (図1)。これにより、任意の OPO パルス間結合が可能となり、神経細胞のネットワークに似た、従来に比して飛躍的に複雑な量子発振器ネットワークを実現しました。

NII-スタンフォード大学のチームは、構築した100ニューロン/5,000シナプス結合の QNN を用いて組合せ最適化問題の一つである最大カット問題^(注3)を解き、厳密解が知られている100ノード以下の問題に対し高速に厳密解を得ることを確認しました (図2)。また、NTT のチームは、2,048ニューロン

/4,000,000 シナプス結合の QNN を用いて、ノード間の結合が多い問題に対しては、現代コンピュータ上に実装したアルゴリズムと比べ約 50 倍の高速化と近似精度の改善を達成しました (図 3)。

【光パラメトリック発振器と量子測定フィードバックから構成される量子ニューラルネットワーク (図 1)】

- ① 時分割多重 OP0 パルスの発生過程において、各 OP0 パルスの振幅・位相を近似測定。
- ② どの OP0 間を結合するかという情報をあらかじめ入力した FPGA に測定結果を入力。これら 2 つの情報をもとに、FPGA において各 OP0 にフィードバック結合する信号を計算。
- ③ 計算したフィードバック信号を光変調器を用いて OP0 と同一の波長と位相をもつ光パルスに重畳し、これを各 OP0 に入力することで、OP0 間の結合を実現。N 個の OP0 に対し、全ての組合せに相当する $N(N-1)$ 通りの OP0 結合をたった 1 つのフィードバック回路で実現。

【100 ノード最大カット問題の厳密解探索 (図 2)】

- ① 厳密解が知られているノード数 100、各ノードが 3 個のエッジで他ノードと結合しているグラフの最大カット問題に対し、解の全候補 ($2^N \approx 10^{30}$) の中から厳密解を成功確率 20% 以上で出力することを確認 (図 2(a))。
- ② 16 ノードの全てのグラフに対する厳密解正答率を実験と数値シミュレーションで比較 (図 2(b))。シミュレーションで予測された結果と実験結果が良く合っていることを確認。

【2,000 ノード最大カット問題の近似解探索 (図 3, 4)】

- ① 厳密解が知られていないノード数 2,000 の最大カット問題の解探索を実施。ランダムグラフ、スケール・フリーグラフ、完全グラフの 3 種のグラフに対し、5 ms の時間内に良い近似解を得ることを確認。(ランダムグラフの場合の解探索結果：図 3)
- ② 特に、結合数約 200 万の完全グラフ問題に対して、デジタルコンピュータ上で実装された従来のアルゴリズム (焼きなまし法^(注 4)) に対し、約 50 倍の高速化を確認 (図 4)。

<技術のポイント>

(1) 長距離光ファイバ共振器を用いた多数の OP0 の一括発生

実験系を図 5 に示します。フィードバック制御により位相を安定化した長さ 1 km の光ファイバ共振器中に、周期分極反転ニオブ酸リチウム (Periodically Poled Lithium Niobate: PPLN) 導波路^(注 5) を挿入します。PPLN 導波路に、波長 768 nm、繰り返し周波数 1 GHz のポンプパルス列を入力します。PPLN 導波路においては、ポンプ波長の 2 倍にあたる 1536 nm の波長において、ポンプ光の位相に対して 0 または π の位相成分だけが増幅される位相感応増幅と呼ばれる現象が得られます。ポンプ光入力直後に位相感応増幅により発生した雑音が種光となり、光ファイバ共振器中の波長フィルタの透過波長を 1536 nm とすることで、位相が 0 または π のみの光が発振する OP0 を実現できます。光ファイバ共振器の一周時間が約 5 μ s、ポンプパルスの時間間隔が 1 ns なので、本実験系を用いて時間的に多重された約 5,000 個の OP0 を一括して発生することができます。

(2) 量子測定フィードバックによる OP0 間の結合

図 1 に構成を示します。OP0 パルスの発生過程において、光ファイバ共振器中を周回する OP0 パルス列のエネルギーを一部とりだし、各 OP0 パルスの位相、振幅を測定します。測定結果は FPGA に入力します。FPGA には、どの OP0 間を結合するかという情報をあらかじめ入力しておきます。FPGA は、これらの情報をもとに、次のステップで各 OP0 に入力するフィードバック信号を計算します。このフィードバック信号を、OP0 と同一の波長と位相をもつ光パルスに重畳し、該当する OP0 に同期して注入することで、OP0 間の結合を実現します。これにより、全ての組合せの OP0 間結合を実装することが可能となります。今回の実験では、最大 2,048 の OP0 に対し本手法を実装することで、2 百万通り以上のスピン間結合 (無向グラフの場合) を実現しました。

<今後の展開>

今後は、より大規模な組合せ最適化問題に対応し従来の計算機に対するいっそうの優位性を示すために、さらなるスピン数の増大を目指します。また、創薬、通信ネットワーク、圧縮センシング、深層学習など、実社会の様々な課題に QNN を適用します。さらに、QNN を遠隔で使用するためのウェブインタ

ーフェースを実装し、広範なユーザがクラウドサービスを利用できるようにすることで、QNN の新たな応用の開拓を目指します。

<参考図>

表 1 : 3つの量子計算原理の比較

	量子コンピュータ	量子アニーラ	量子ニューラルネットワーク
計算原理	状態ベクトルのユニタリ回転 (閉鎖系)	ハミルトニアン of 断熱変化 (閉鎖系)	測定フィードバック系の量子相転移 (開放系)
開発機関	IBM/Google	D-WAVE	NII-Stanford NTT
ビット数	5~9ビット	1,152ビット	100ビット 2,048ビット
結線数	≒10	3,300	1万 400万
動作温度	極低温 (10mK)	極低温 (10mK)	室温 (300 K)
物理系	超伝導量子回路	超伝導量子回路	光パラメトリック発振器ネットワーク
適用先	問題に隠れた周期性がある場合 (暗号解読など)	NP困難・NP完全問題 (組合せ最適化など)	NP困難・NP完全問題 (組合せ最適化など)
有効ビットの割合	-	95%	100%
解ける問題サイズ	-	$N \approx 15 \sim 17$	$N \approx 2,048$

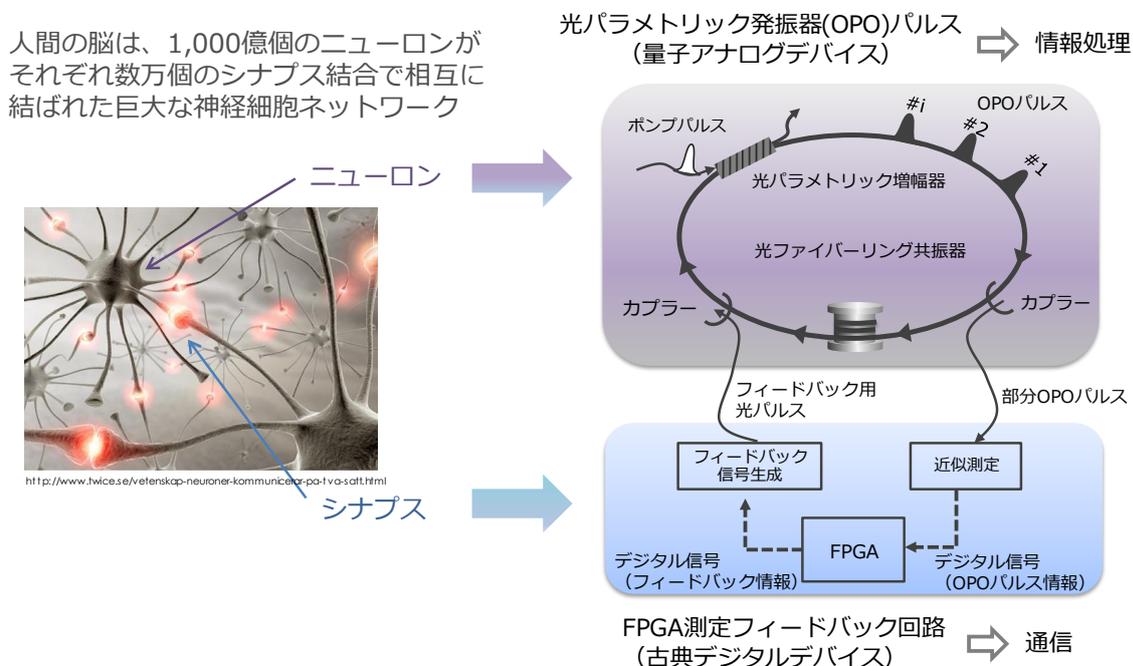


図 1 : 光パラメトリック発振器と量子測定フィードバックから構成される量子ニューラルネットワーク

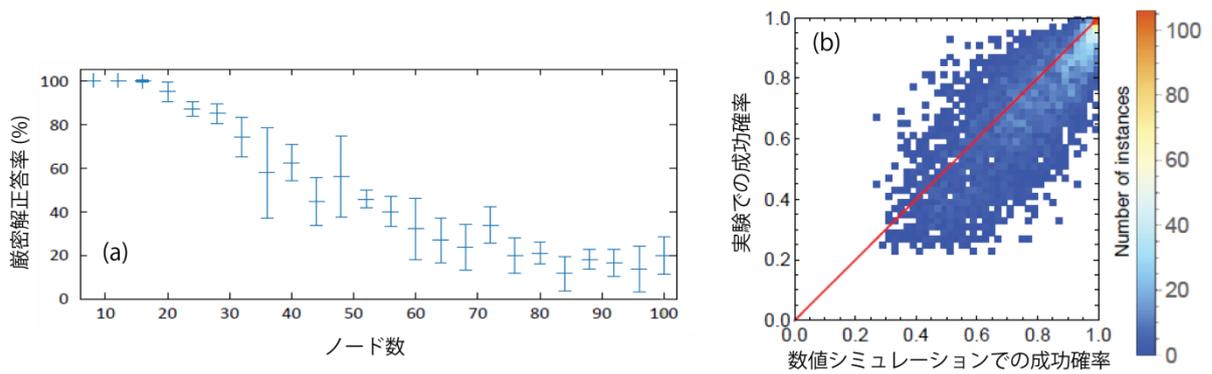


図2：各ノードが3個の他ノードと結合しているグラフの最大カット問題に対する解探索結果。(a) ノード数と厳密解正答率の関係。ノード数 100 の問題に対して、成功確率約 20%で最適解を出力する。(b) 16 ノードの全てのグラフ (総数 4, 060) に対する成功確率の実験および数値シミュレーションの比較。

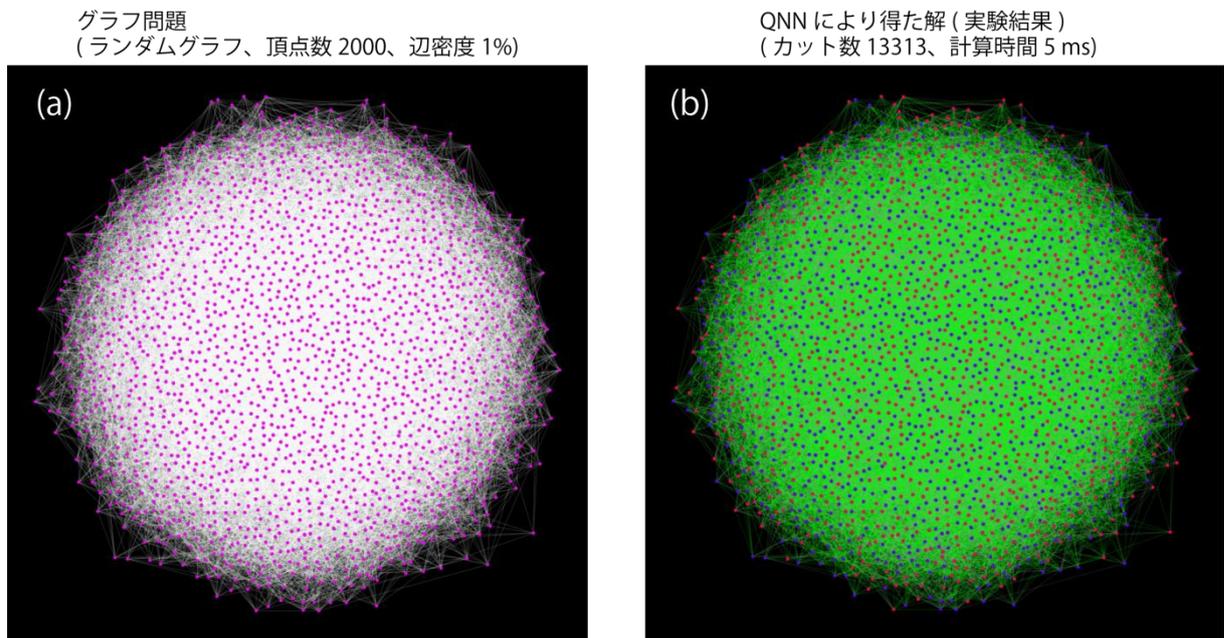


図3：QNNによる2,000ノードグラフ最大カット問題(ランダムグラフ)の解探索結果。(a) グラフ問題。ピンクの点が各ノードを、白線がエッジを表す。(b) QNNによる5msの計算時間で得た解。ノードの集合が赤と青のノード群に分割された結果、緑線で示すエッジを切ることができた。

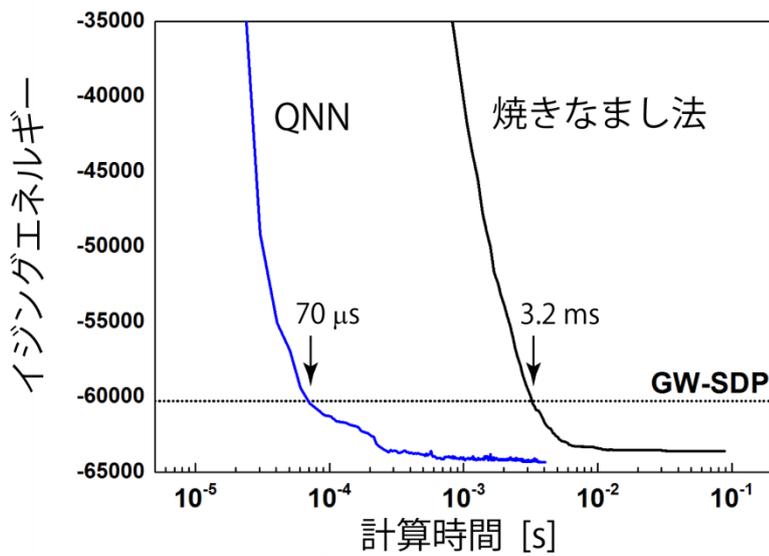


図4 : QNN とデジタルコンピュータ上に実装された従来アルゴリズム (焼きなまし法) とのイジングエネルギーの降下時間の比較。点線は精度保証のあるアルゴリズム (SemiDefinite Programming relaxation algorithm by Goemans and Williamson: GW-SDP) により得られたエネルギー基準値。エネルギー基準値に到達するまでに要した時間は、70 μ s (QNN)、3.2 ms (焼きなまし法) であった (それぞれ 100 回の試行のうちの最速値)。

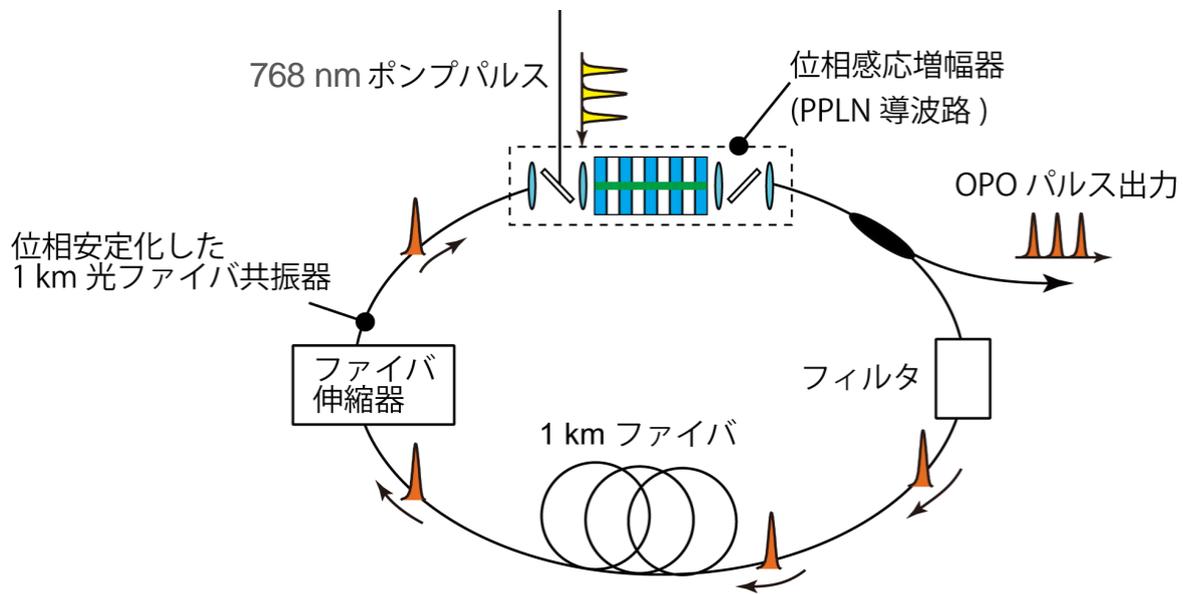


図5 : 長距離光ファイバ共振器による多数の OPO の一括発生

<用語解説>

(注 1) 波束の収縮によりトリガーされる相転移 :

量子力学では、測定する前はどんな測定値が得られるかはあらかじめ特定できないが、ひとたび測定すると測定値の近くに波束は引き寄せられ、不確定さも小さくなる (図 6(a))。この測定結果に基づくフィードバック信号を他の OPO パルスへ結合すると、エネルギーの低い状態 $|\uparrow\downarrow\rangle$ に 2 つの波束が変化する (図 6(b))。このような測定フィードバックによる波束の収縮が OPO の発振 (相転移) で起こると、一気にイジングモデルの基底状態が実現される。

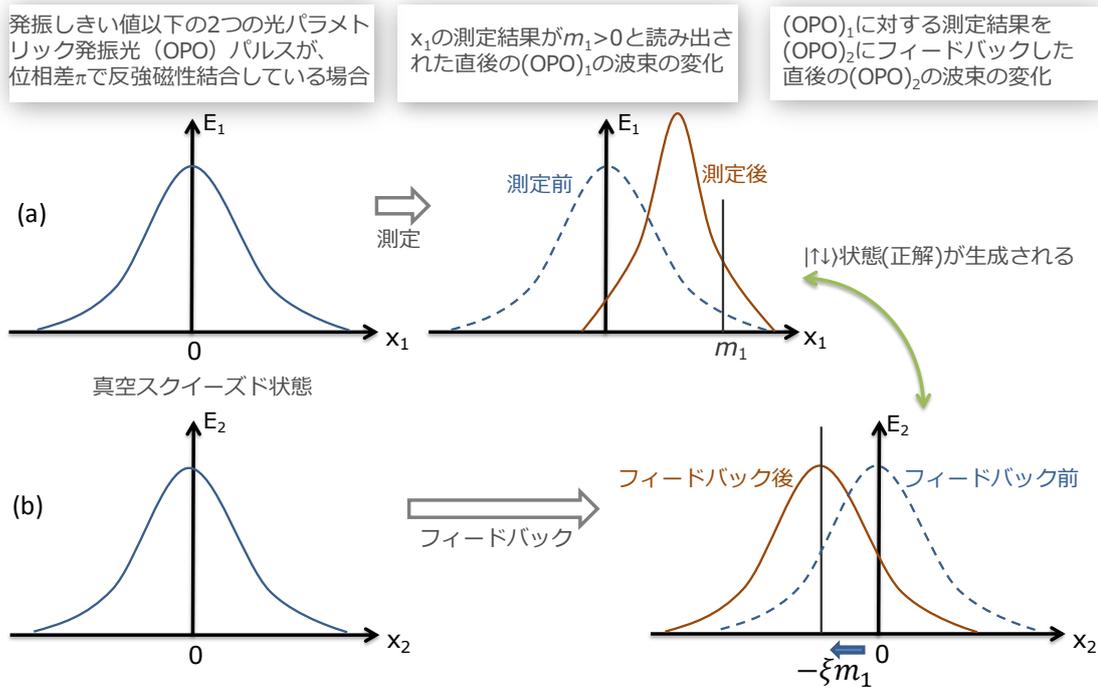


図 6 : 測定フィードバックによる波束の収縮

(注 2) スピン :

電子などの素粒子は小さな磁石としての性質をもつ。この磁石としての性質を古典的な球の自転になぞらえて「スピン」と呼ぶ。

(注 3) 最大カット問題 :

頂点(ノード)と、ノードを結ぶ線(エッジ)からなるグラフにおいて、ノードを 2 つの部分集合に分割する際、切れるエッジ数が最大となる分け方を求める問題。

(注 4) 焼きなまし法 :

シミュレーテッド・アニーリング (Simulated Annealing, SA) とも呼ばれ、確率的探索を用いて最適化問題を解く汎用近似解法の一つ。広い探索空間内の大域的最適解に対して、精度保証はないが多くの問題により近似解を与えるヒューリスティックアルゴリズム。

(注 5) 周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN) 導波路 :

異なる波長の光同士を相互作用させることが可能な「非線形光学効果」と呼ばれる特殊な特性を持つ結晶であるニオブ酸リチウム (LiNbO_3) において、自発分極と呼ばれる結晶内の正負の電荷の向きを一定の周期で強制反転させた人工結晶を用いた光導波路。高い非線形光学効果を得ることができる。

<論文名>

“A coherent Ising machine for 2000-node optimization problems” to appear in Science
(2000 ノードの最適化問題を解くコヒーレントイジングマシン)

“A fully-programmable 100-spin coherent Ising machine with all-to-all connections” to appear in Science
(全結合を有する完全にプログラム可能な 100 スピンのコヒーレントイジングマシン)

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

武居 弘樹 (タケスエ ヒロキ)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所
〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1
Tel : 046-240-3489 Fax : 046-240-4726
E-mail : takesue.hiroki@lab.ntt.co.jp

宇都宮 聖子 (ウツノミヤ ショウコ)

国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系
〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2 学術情報センター 1615-2
Tel : 03-4212-2559 Fax : 03-4212-2641
E-mail : shoko@nii.ac.jp

<ImPACT の事業に関すること>

内閣府 革新的研究開発推進プログラム担当室
〒100-8914 東京都千代田区永田町 1-6-1
TEL : 03-6257-1339

<PM およびプログラム内容に関すること>

科学技術振興機構 革新的研究開発推進室
〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K' s 五番町
Tel : 03-6380-9012 Fax : 03-6380-8263
E-mail : impact@jst.go.jp

<報道担当>

科学技術振興機構 広報課
〒102-8666 東京都千代田区四番町 5 番地 3
Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432
E-mail : jstkoho@jst.go.jp